

陽電子消滅法による六方晶金属および合金の電子状態と照射損傷に関する研究

著者	小池 修一
号	793
発行年	1979
URL	http://hdl.handle.net/10097/9529

氏 名	こ いけ しゅう いち 小 池 修 一
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 55 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 原子核工学専攻
学 位 論 文 題 目	陽電子消滅法による六方晶金属および合金の電子状態と照射損傷に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 平林 真
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 平林 真 東北大学教授 諸住正太郎 東北大学教授 本間 敏夫 東北大学教授 小岩 昌宏

論 文 内 容 要 旨

金属および合金中の伝導電子の状態や格子欠陥の挙動を解明することは，材料工学および金属物性の分野における重要な課題である。陽電子の物質中における消滅現象は，これらの課題を研究する上で特徴のある実験手段を提供する。その有効性は陽電子の反粒子性に由来している。すなわち，電子との対消滅により放出される光子は必然的に消滅前の電子状態に関する情報を含んでおり，また陽電子はその正電荷のために格子欠陥（原子空孔，そのクラスター，転位等）に優先的に捕獲されて消滅する。

本論文は，この様な陽電子消滅現象を利用して六方晶構造を持つ 2 元合金相の電子構造およびチタンの中性子照射損傷効果について研究した結果をまとめたものである。本論文は全編 6 章からなり，以下その概略を述べる。

第 I 章 序 論

第 1 節では，陽電子消滅現象の一般的な特徴について述べた。

第 2 節では，陽電子の消滅過程および陽電子寿命と消滅 2 光子の角度相関という 2 つの実験手法の原理と特徴について述べ，次いで陽電子消滅法を応用した金属と合金に関する従来の研究を概観した。

第 3 節では，本論文の目的と意義について述べた。

第Ⅱ章 実験方法

第1節では、試料作製法、特にブリッジマン法による合金単結晶の育成法について詳述した。

第2節では、陽電子寿命測定における陽電子線源、低温用試料容器、測定回路、およびデータ解析法について述べた。

第3節では、角度相関測定における陽電子線源、低温および高温用試料容器、測定装置、およびデータ解析法について述べた。

第Ⅲ章 Ti における中性子照射損傷

第1節では、まず各種の格子欠陥による陽電子の捕獲現象とそこでの陽電子寿命について述べ、寿命測定法が通常の電子顕微鏡では観察できない小さな原子空孔クラスターの研究に特に有効であることを示した。次いで、Ti の中性子照射損傷に関する従来の研究を概観し、通常の電子顕微鏡を用いた研究ではボイド（原子空孔クラスター）の存在が認められていないことを強調した。

第2節では、空孔クラスター形成の可能性およびその焼鈍挙動を陽電子寿命測定により明らかにするという本章の目的を述べた。

第3節では、 $10^{19} \sim 10^{20} \text{ n/cm}^2$ の中性子照射直後および $100 \sim 600^\circ\text{C}$ の範囲における1時間の等時焼鈍後の陽電子寿命測定結果について述べた。照射試料では、陽電子寿命スペクトルに長寿命成分 ($\tau_2 = 300 \sim 500 \text{ psec}$) が存在することを見出し、これが原子空孔クラスターの形成によるものであることを指摘した。

第4節では、以上の結果を考察し、従来の電子顕微鏡による観察結果との対比を行った。

第5節では、本章における結果を要約した。

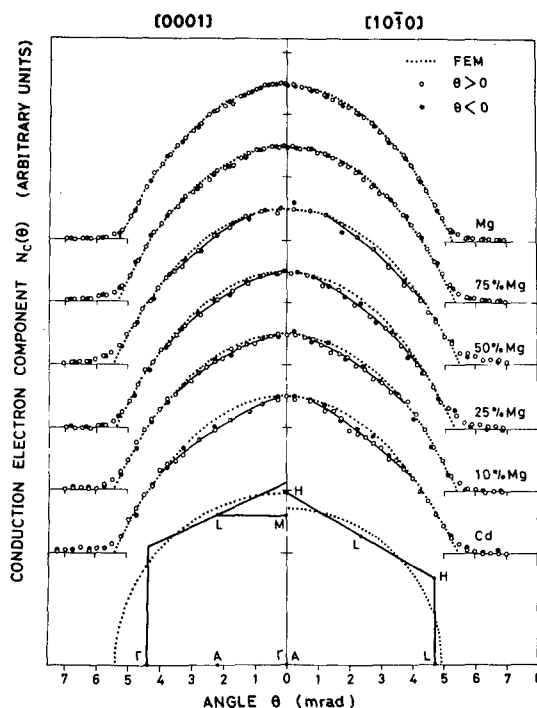
第Ⅳ章 Cd-Mg 合金のフェルミ面

第1節では、最密六方 (HCP) 構造を持つ金属および合金のブリルアンゾーンおよび軸比 c/a の問題について述べた。

第2節では、Cd と Mg のフェルミ面および Cd-Mg 合金の電子構造に関する従来の研究を概観した。

第3節では、この合金のフェルミ面と電子

図1 Cd-Mg 合金単結晶の角度相関曲線における伝導電子との消滅成分。点線は自由電子モデルによる計算結果。下部に示した図は、運動量軸 ($\theta = P/mc$) と同一スケールで描いた自由電子フェルミ球 (点線) とブリルアンゾーン (実線) の断面である。



構造を明らかにするという本章の目的を述べた。

第4節では、Cd-Mg合金単結晶について角度相関と陽電子寿命の測定結果を述べた。〔0001〕および〔1010〕方向の運動量成分に関する角度相関曲線の伝導電子成分が、Cdおよび高Cd濃度の合金において自由電子モデルから著しいずれを示すことを見出した(図1)。また各合金組成におけるフェルミ運動量を評価し、さらに組成による陽電子寿命の変化も明らかにした。

第5節では、まず角度相関の伝導電子成分(図1)を陽電子消滅の独立粒子モデルに基づいた偽ポテンシャル計算と比較して、フェルミ面とブリルアンゾーン上のエネルギーギャップについて明らかにした。両者の合金組成による変化は対称点L付近において著しいことを結論した(図2および3)。また、角度相関と陽電子寿命の測定データに基づいて、陽電子は、Mg原子からCd原子への価電子移動(Charge Transfer)のためにCd原子位置付近に偏在する傾向があると結論した。

第6節では、本章における主要な結論を要約した。

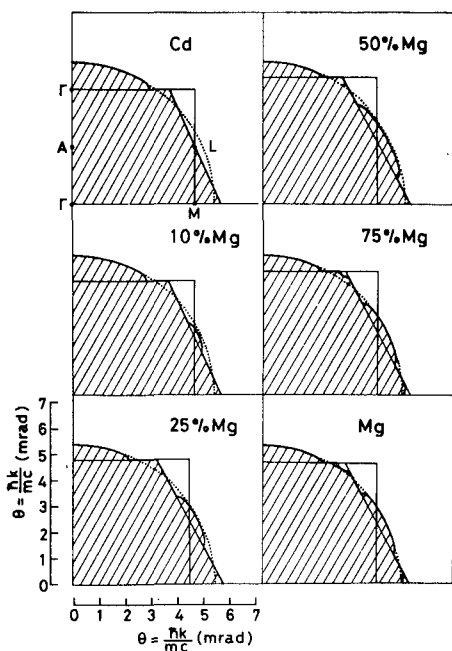


図2 Cd-Mg合金のフェルミ面の Γ MK断面。点線は自由電子フェルミ球断面である。

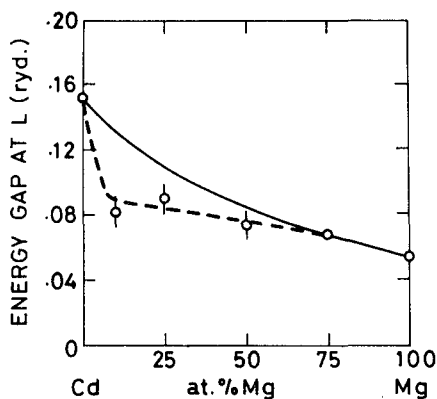


図3 Cd-Mg合金のL点におけるエネルギーギャップの組成依存性。実線は純金属の偽ポテンシャルの組成平均から期待される変化である。実測値(白丸)は10% Mg付近で急激な減少を示す。

第V章 Ag-AlおよびCu-Ge合金のHCP中間相のフェルミ面

第1節では、貴金属と多価金属とからなる合金のフェルミ面と電子構造に関する研究を概観した。

第2節では、本章の目的を述べた。すなわち、Ag-AlおよびCu-Ge系HCP合金相のフェルミ面を定量的に明らかにし、両合金系の電子構造の類似性または相違点についての知見を得ることが本章の目的である。

第3節では、3または5種の方位を持つ合金単結晶についての角度相関測定の詳細な結果と、これを格子調和関数を用いて解析した消滅光子の3次元運動量分布 $\rho(\vec{P})$ について述べた(図4)。

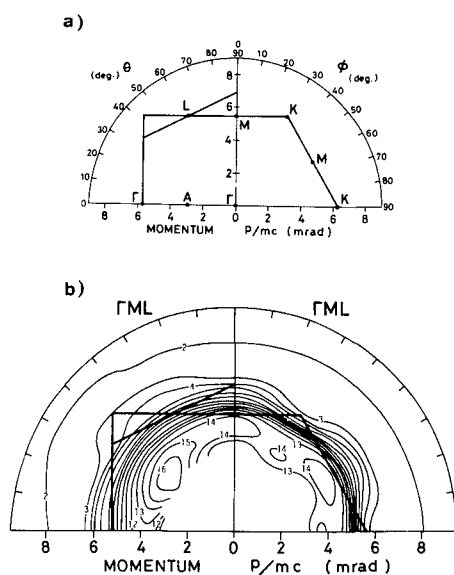


図4 (a) HCP金属のブリルアンゾーン断面と対称点付置。 θ , ϕ は ΓA および ΓM 軸を主軸とする球座標角度。(b) Ag-Al ($e/a = 1.57$)の5方位解析による消滅2光子の運動量分布 $\rho(\vec{P})$ の等高線図。

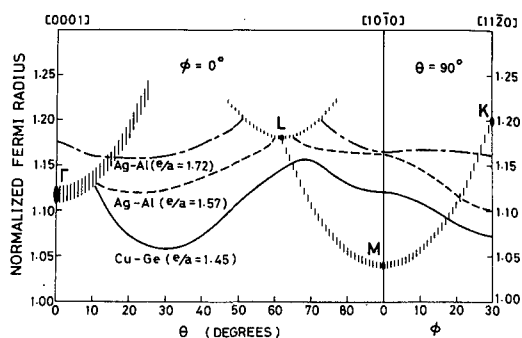


図5 Ag-Al およびCu-Ge 合金の規格化したフェルミ半径の比較、各合金のブリルアンゾーン面はたて線ど示した範囲内にある。

特に、 $\rho(\vec{P})$ の特徴的な異方性を見出し、フェルミ半径を定量的に評価した(図5)。最後に、Cu-GeおよびAg-Al合金のフェルミ面の特徴とその電子濃度 e/a 依存性を要約した。

第4節では、フェルミ半径の異方性(図5)を比較することにより、両合金系の電子構造の類似点および相違点を明らかにした。両合金のフェルミ面の概略は類似しているが、貴金属原子に由来するs-d混成(Hybridization)効果が、HCP構造の高濃度合金相においても重要な役割を果たしていると推論した。さらに本章で得られた結果は、従来の電子比熱の測定結果をより明確に説明することを示した。

第5節では、本章における主要な結論を要約した。

第VI章 総括

本論文における成果を総括した。

審 査 結 果 の 要 旨

物質中における陽電子の消滅現象は、材料の照射損傷、あるいは固体の電子状態の新しい研究手段としてその発展が強く望まれている。著者はこの方法を用いて、従来研究のほとんど行われていなかった六方晶金属チタンの中性子照射損傷、および六方晶高濃度合金の電子状態に関する一連の研究を行った。本論文はこれらの結果をとりまとめたもので、全篇6章よりなる。

第1章は序論であり、陽電子消滅法の原理と特徴を記し、本研究の目的と意義を述べている。

第2章は陽電子の消滅までの寿命測定および電子との対消滅により発生する光子の角度相関測定における実験方法、装置、データ解析法、ならびに単結晶作製法について述べている。

第3章は陽電子寿命測定によるチタンの中性子照射効果に関する実験結果の記述である。日本原子力研究所材料試験炉（JMTR）を用いて、 $0.4\text{--}4 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ の高速中性子を照射したチタン中の陽電子寿命には、180–230 ps 程度の通常寿命成分 τ_1 のほかに、300–500 ps の長い成分 τ_2 が現われることを見出した。これは照射によって原子空孔クラスターが形成されたことを示すもので、チタンについては新しい知見である。また照射後の焼鈍による回復過程において、各寿命成分の興味ある変化を見出している。

第4章では、六方晶Cd–Mg系の全率固溶体の単結晶について、角度相関および寿命測定の結果を述べている。フェルミ面の合金組成による変化、とくに自由電子モデルからのずれを詳しく検討し、電子構造の組成依存性を明らかにした。また、Cdに富む合金中の陽電子は、Cd原子付近に偏在する傾向があることを指摘している。

第5章は、Ag–AlおよびCu–Ge系の六方晶合金相の角度相関法による電子状態に関する結果を述べている。3または5種類の結晶方位をもつ合金単結晶についての測定結果を、格子調和関数を用いて解析し、フェルミ面の異方性とその組成依存性を明らかにしている。

第6章は総括である。

以上要するに、本論文は陽電子消滅法を用いて、従来不明であった中性子照射したチタン中の格子欠陥の挙動、およびCd–Mg、Ag–Al、Cu–Ge系高濃度合金のフェルミ面の異方性などを明らかにしたもので、原子核工学および金属物性学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。